

# Un modèle sémantique spatio-temporel pour capturer la dynamique des environnements

Benjamin Harbelot\*, Helbert Arenas\*\*, Christophe Cruz \*\*\*

\*benjamin.harbelot@gmail.com

\*\*helbert.arenas@checksem.fr

\*\*\*christophe.cruz@u-bourgogne.fr

**Résumé.** Les Systèmes d'Information Géographique se sont peu à peu imposés comme des outils performants pour organiser, représenter, analyser et visualiser des données géographiques. Toutefois, l'intégration d'une dimension temporelle dans les SIG reste un défi de la recherche en sciences de l'information géographique. Dès lors, le développement de modèles spatio-temporels adaptés à l'étude de phénomènes géographiques réels devient un enjeu majeur dans la conception de systèmes d'informations dédiés à l'évolution d'entités spatiales. Dans ces travaux, nous proposons un nouveau modèle spatio-temporel basé sur une ontologie intégrant les connaissances des experts sur les données géographiques représentées. A terme, les capacités sémantiques proposées dans ce modèle permettent d'assister les experts dans la représentation et l'analyse d'un phénomène spatio-temporel en prenant en compte les informations contextuelles de l'environnement géographique.

## 1 Introduction

L'information géographique suscite un intérêt croissant, tant de la part des particuliers et des entreprises que des autorités publiques. Si les besoins en données géographiques ont toujours existé, la quantité d'informations générée a été tellement massive que les outils disponibles ont longtemps connu des difficultés à traiter efficacement ces données. Plus récemment, l'apparition d'une dimension temporelle dans certains Systèmes d'Information Géographique a étendu les champs d'étude et d'application liés à la géomatique. Désormais les objets à référence spatiale peuvent être étudiés dans leur dynamique qu'il s'agisse d'un mouvement ou d'un changement. Cependant, conjointement à l'ajout de la dimension temporelle, la quantité de données à stocker et à traiter s'est à nouveau considérablement accrue soulevant ainsi de nouveaux défis scientifiques et techniques. Le traitement d'informations aussi massives et complexes que les données spatiotemporelles nécessite d'être vigilant sur la modélisation afin de faciliter l'intégration et l'exploitation de ces données. Le suivi dans le temps d'objets spatiaux est l'un des enjeux majeurs de la modélisation spatiotemporelle. L'évolution dans le temps d'un objet spatial se compose d'une succession de transitions induisant le passage d'un état à un autre (changement de forme, de localisation, changement sur les attributs). Chaque transition de chaque objet se doit de représenter une évolution dans le respect de la réalité modélisée.

Il est fréquent de trouver des jeux de données partiellement complets et par conséquent, partiellement exploitables. Les jeux de données incomplets sont souvent dûs à la réutilisation de données spatiales historiques, on obtient alors l'état des objets à différentes époques, cependant les transitions d'un état à un autre pour chaque objet sont absentes et doivent être inférées afin d'assurer le suivi des objets dans le temps.

Dans ce papier, nous introduirons brièvement quelques notions de la modélisation spatio-temporelle. Puis, nous étudierons les différents modèles proposés dans la littérature pour répondre aux besoins de la modélisation spatio-temporelle, nous verrons ensuite en quoi l'utilisation d'une ontologie semble adaptée à ces besoins. Nous présenterons alors le modèle Continuum basé sur une ontologie afin de renforcer les capacités de représentation et d'analyse en modélisant de manière structurée l'environnement géographique dans son contexte et en fournissant des outils de raisonnement capables de générer des connaissances à partir des informations stockées dans l'ontologie. Enfin, nous présenterons un cas d'utilisation de notre modèle dans le cadre de l'étude de la décolonisation.

## 2 Modélisation spatiotemporelle

Afin de développer notre approche de modélisation, nous introduisons dans cette section quelques notions spatiales et temporelles.

### 2.1 Entités spatio-temporelles

Une entité spatio-temporelle est une représentation des entités du monde réel composée d'une identité, de propriétés descriptives et de propriétés spatiales. Tandis que l'identité décrit une sémantique fixe de l'entité, les propriétés descriptives et spatiales peuvent varier dans le temps et constituent la partie dynamique de l'entité. Lorsque l'identité d'une entité varie, on assiste à un type particulier d'évolution où l'entité spatio-temporelle est transformée en une nouvelle entité. Dans la littérature, on trouve deux principaux types d'entités spatio-temporelles : 1) les objets mouvants, comme par exemple un taxi sillonnant les rues de la ville, et 2) les objets changeants, par exemple, une région dont la disposition des frontières administratives évolue dans le temps. Dans ce papier, nous nous intéresserons à ce deuxième cas.

### 2.2 Identité

Les applications spatio-temporelles ont vu le jour pour répondre au besoin de représenter des phénomènes impliquant l'espace et le temps. La modélisation d'un phénomène est intimement liée à celle de ses entités ainsi qu'à l'ensemble des changements intervenants sur ces entités. Dès lors, le concept d'identité a progressivement été introduit afin de caractériser les changements (Del Mondo et al. (2013)), (Del Mondo et al. (2010)), (Muller (2002)). L'identité peut se définir comme le caractère unique d'un objet, indépendamment de ses attributs ou de ses valeurs. C'est le trait qui distingue un objet de tous les autres. L'identité est essentielle dans la conceptualisation ainsi que dans la modélisation d'un phénomène. Cependant, cette notion est très subjective car elle dépend des critères choisis par l'utilisateur pour définir l'identité d'une entité. Généralement l'identité dépend du type d'entité et du phénomène.

### 2.3 Les relations de filiations

La relation de filiation définit le lien de succession qui existe entre les différentes représentations d'un même objet à différents moments du temps. Les relations de filiations trouvent leur intérêt dans le cadre de changements élémentaires tels que des divisions ou des fusions d'entités. D'autres changements spatiaux plus ou moins complexes existent et nécessitent d'identifier les entités "parents" et "enfants". A ce stade, La filiation se base uniquement sur des relations spatiales, c'est pourquoi elle peut être qualifiée de filiation spatiale dans le contexte des changements spatiaux. Ces changements spatiaux peuvent, en outre, révéler des changements sur la nature de l'entité, c'est pourquoi la relation de filiation est intimement liée à la notion d'identité. Cette relation est essentielle pour maintenir l'identité d'une entité qui évolue ainsi que de suivre l'évolution dans le temps. Il est également nécessaire d'identifier les nouvelles entités qui peuvent résulter d'une évolution. La mise en place d'une relation de filiation induit une dépendance à l'identité. Il y a alors deux types généraux de relations de filiation : continuation et dérivation (Harbelot et al. (2013a)), (Stell et al. (2011)), (Hornsby et Egenhofer (2000)). Dans le premier cas, l'identité est conservée. L'entité continue d'exister, mais a connu un changement. Alors que dans le deuxième cas, une nouvelle entité est créée à partir d'une autre après avoir été soumise à une évolution. Contrairement aux relations de continuation, les relations de dérivation peuvent concerner plusieurs entités en même temps.

## 3 Etude des différentes approches de modélisation spatio-temporelle

L'évolution d'une entité spatiale dans le temps peut être vue soit comme une succession d'états (ou représentations) de l'entité, soit comme une succession de transition intervenant sur cette entité au cours du temps. Les modèles de la première proposition se basent sur des approches continues ou discrètes. Des exemples de modèles sont le modèle snapshot (Armstrong (1988)), le modèle Space-Time Composites (STC) (Langran et Chrisman (1988)), le modèle Spatio-temporal Object (Worboys (1994)). L'inconvénient de ces modèles est qu'ils ne représentent que des changements soudains au travers desquels il est difficile d'identifier des processus tels que le changement ou le mouvement d'une entité de l'environnement géographique. D'autres modèles basés sur les approches continues ou discrètes ont été proposés pour gérer les changements liés à l'identité (Hornsby et Egenhofer (2000)) ou encore les changements sur les relations topologiques étudiées à l'aide de matrices d'intersection (Egenhofer et Al-Taha (1992)), toutefois l'analyse des causes du changement nécessaire à l'étude des phénomènes sont difficiles à déduire en utilisant ce type de modélisation. Par conséquent, cette première approche de modélisation ne permet pas une analyse complète de l'évolution. Pour pallier à ce problème, l'approche de modélisation basée sur les événements et processus a peu à peu vu le jour. Cette approche considère que les entités spatiales évoluent sous l'impulsion d'un événement ou d'un processus et dont l'objectif est d'analyser les causes et les conséquences. Parmi ces modèles, il est possible de citer le modèle Event-Based Spatiotemporal Data Model (ESTDM) (Peuquet et Duan (1995)), les processus composite (Claramunt et Thériault (1996)) ou encore le modèle de changement topologique basé sur les événements (Jiang et Worboys (2009)). Le modèle ESTDM décrit un phénomène au travers d'une liste d'événement, un nouvel événement est créé en bout de liste à chaque fois qu'un changement est détecté. Toutefois

ce modèle ne prend en compte que des données de type raster et les liens de causalité entre les événements sont difficilement mis en évidence dans ce modèle. Pour répondre à ce problème, le modèle des processus composites a pour objectif de représenter les liens entre les événements ainsi que leurs conséquences, en outre, l'auteur avance que le modèle de donnée doit différencier ce qui est spatial, temporel et thématique. Le modèle des processus composites se base sur un langage permettant de décrire la sémantique liée à un phénomène du monde réel. Ce phénomène est assimilé à un processus composite, c'est-à-dire une suite de processus qui décrivent la dynamique du phénomène. Un processus composite est, par exemple, la trajectoire d'un bateau et peut se décomposer en 3 processus : stabilité, déplacement, rotation. Enfin, le modèle de changement topologique basé sur les événements décrit chaque snapshot de l'environnement géographique à des instants de temps consécutifs sous la forme d'un arbre. Chaque arbre est lié au suivant et au précédent au travers de ses noeuds. Le lien entre deux arbres est un changement topologique qui révèle la création d'une entité sur l'environnement géographique, la suppression d'une entité, la division ou la fusion d'une entité ou aucun changement. La succession de ces changements topologiques permet de représenter des changements complexes.

## **4 L'ontologie comme support de la modélisation spatiotemporelle**

En réalité, les deux approches que nous venons d'étudier sont complémentaires dans la modélisation d'un phénomène réel au sens où une transition correspond au passage d'une entité d'un état à un autre. En outre, les entités d'un espace géographique sont susceptibles d'entretenir différentes relations spatiales ou sémantiques entre elles, et ce, quelque soit l'état de leur évolution. Dès lors, il paraît naturel de constater que la modélisation d'un phénomène dans le temps peut être assimilée à un réseau dans lequel les entités et leurs états sont vus comme des sommets tandis que les relations correspondent aux arêtes. Plusieurs travaux liés à la géomatique se sont appuyés sur la théorie des graphes pour des applications telles que la modélisation d'espaces urbains (Jiang et al. (2000)), l'étude de réseaux routiers (Jiang et Claramunt (2004a)) ou encore la modélisation de la structure d'un territoire au travers de graphes de connectivités (Jiang et Claramunt (2004b)). Cependant, tous ces exemples se focalisent sur la structure spatiale et omettent la dimension temporelle qui impose de définir différemment le graphe modélisant le phénomène. Les transitions entre les différents états pour chaque entité sont au coeur de la modélisation spatio-temporelle car elles permettent de suivre une entité dans le temps. Dans la suite de ce papier, ces transitions sont confondues avec les relations de filiations présentées précédemment. La modélisation d'un phénomène génère un graphe complexe composé de relations telles que les relations temporelles, sémantiques, spatiales, ou encore des relations de filiation. L'ontologie se présente comme un modèle de données capable de représenter les concepts d'un domaine, ainsi que les relations entre ces concepts. Les concepts au sein d'une ontologie sont organisés dans un graphe permettant de modéliser l'ensemble des relations nécessaires à la modélisation spatio-temporelle. Traditionnellement utilisées pour représenter les éléments d'un domaine de connaissance, les ontologies se fondent sur les notions d'individus, classes, attributs, relations et événements. Dès lors, les entités peuvent être assimilées à des individus et regroupées au sein de classes définies selon le type d'entité. Les attributs constituent les propriétés, caractéristiques ou paramètres que les entités peuvent posséder et partager

tandis que les relations définissent les liens qu'entretiennent entre elles les entités. Enfin, les événements correspondent aux changements subis par des attributs ou des relations. Les informations disponibles sur des entités à modéliser peuvent être plus ou moins précises, par exemple, une entité de type "étendue d'eau" peut être spécialisée en un type "étang", "lac", "mer", "océan", etc... Une même spécialisation/généralisation peut être observée sur les relations entre les entités, par exemple, une relation appelée "relation spatiale" entre deux entités peut être spécialisée comme une "intersection", "adjacence", etc... Dans les deux cas, l'ontologie apporte une hiérarchie basée sur la subsumption qui permet de représenter ou exploiter la connaissance à différents niveaux de détails. Si l'ontologie s'impose comme un support particulièrement complet pour représenter et classer la connaissance liée à un domaine, elle est également largement utilisée pour raisonner à propos des entités modélisées et présente des capacités d'analyses supérieures aux systèmes d'informations traditionnels.

## 5 Le modèle Continuum

L'évolution d'entités spatiales dans le temps génère un graphe complexe de relations qui peut être modélisé à l'aide d'une ontologie (Harbelot et al. (2013c)), (Harbelot et al. (2013b)). La construction de l'ontologie est soumise à un langage de spécification. Dans ces travaux, nous utilisons le langage OWL au niveau DL (Ontology Web Language Description Logics) permettant une expressivité adaptée aux besoins de la modélisation et également des algorithmes d'inférence décidables pour raisonner sur l'ontologie. Si les relations sémantiques et les relations de subsumptions sont naturellement présentes et faciles à définir au sein d'une ontologie, le stockage de l'information géographique et la représentation d'une même entité à différentes époques ainsi que les relations de filiation entre les différents états de cette entité nécessitent des méthodes spécifiques. En outre, la modélisation spatio-temporelle s'impose comme le support de l'étude de l'environnement et des phénomènes géographiques. Dès lors, le système se doit de fournir des fonctionnalités d'analyses spatiales et temporelles au travers de l'outil de recherche mis en place sur le système d'information.

### 5.1 Modèles de données pour la gestion de l'information spatiale et l'évolution temporelle d'objets

La gestion de données géospatiales dans le Web Sémantique est un domaine émergent pour lequel une large majorité de la communauté s'est réunie autour de la définition d'un standard : GeoSPARQL (Consortium et al. (2012)). GeoSPARQL se compose d'une petite ontologie destinée à fournir une représentation spatiale aux entités définies dans une ontologie de domaine. Outre le stockage de l'information géographique, GeoSPARQL sert également de support au raisonnement spatial quantitatif et qualitatif au sein du langage de requête SPARQL. Cependant, GeoSPARQL ne fournit aucun support pour l'intégration de la dimension temporelle. Des ontologies de temps comme OWL-Time ou SWRL Temporal Ontology permettent d'introduire des données temporelles au sein d'une ontologie au travers d'instantanés ou intervalles de temps, de concepts temporels et des relations topologiques temporelles définies par Allen (Allen (1983)).

Mais la représentation du temps ne suffit pas à modéliser l'évolution d'une entité ainsi que ses propriétés et relations. Il existe deux principales théories philosophiques pour la représen-

tation d'entités évoluant dans le temps : l'*endurantisme* et le *perdurantisme*. L'*endurantisme* considère tout objet comme une entité en trois dimensions qui existe de manière invariante à n'importe quel instant de son existence. Le *perdurantisme*, quant à lui, est considéré comme une vue des objets en quatre dimensions dans laquelle les entités sont divisées en parties temporelles appelées *timeslices* (Welty et al. (2006)). Chacun des *timeslices* est une représentation partielle des entités, et valide sur une période ou à un instant de temps donné. Par conséquent, la représentation complète d'une entité au cours du temps est le résultat de l'aggrégation de tous les *timeslices*. La représentation du changement des propriétés d'un objet se réalise à travers l'utilisation de *fluents* qui sont des propriétés valides uniquement durant un certain intervalle. Le *perdurantisme* offrant plus d'avantages que l'*endurantisme* en permettant une représentation plus complète des phénomènes du monde réel (Al-Debei et al. (2012)), nous basons notre modèle sur cette approche. Pour cela, des ontologies de haut niveau basées sur les ontologies de temps ont vu le jour pour modéliser des entités selon une approche perdurantiste. Ces ontologies sont connues sous le nom d'ontologie de *fluents* parmi lesquelles nous retiendrons l'approche *4D-Fluent* (Welty et al. (2006)) ou encore *TOWL* (Milea et al. (2007)). Toutefois, ces ontologies de *fluents* n'ont pas été définies à destination de la modélisation spatio-temporelle et doivent être ajustées pour répondre aux besoins du domaine.

GeoSPARQL permet une représentation spatiale des entités et fournit des fonctions d'analyses spatiales, cependant l'usage de ce standard reste destiné à des applications statiques. Les ontologies de *fluents*, à l'inverse, ont été proposées pour représenter l'évolution dans le temps au travers des *timeslices* et des *fluents*, toutefois, l'application au domaine géospatial nécessite quelques adaptations pour répondre pleinement aux besoins de la modélisation. Enfin, les ontologies de *fluents* représentent l'évolution d'une entité via une succession de *timeslices* sans exprimer de liens explicites entre les *timeslices* consécutifs. Ce lien entre *timeslices* appliqué au domaine du géospatial est assimilé à la relation de filiation et s'avère essentiel pour exprimer et comprendre des phénomènes géographiques tels que la fusion ou la division d'entités spatiales.

## 5.2 Présentation du modèle Continuum

Le modèle Continuum tire avantage des capacités spatiales de GeoSPARQL ainsi que des méthodes proposées dans les ontologies de *fluents* pour représenter l'évolution. En outre, ce modèle permet de représenter le lien de filiation entre les *timeslices* consécutifs liés à une entité. Le modèle Continuum a été proposé pour répondre au besoin de modélisation des changements qui s'opèrent sur les entités spatiales. Ces changements sont caractérisés par des modifications spatiales (liées à la position ou à l'empreinte spatiale de l'entité), liées à la sémantique ou liées à l'identité des entités. Dès lors, le modèle intègre et distingue les relations liées à l'espace (relations topologiques), au temps (relations d'Allen (Allen (1983))), à la sémantique et à l'identité (relation de filiation).

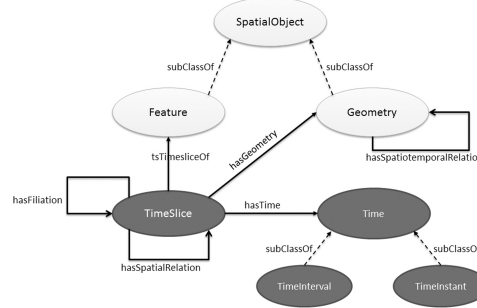


Figure 1 : Ontologie noyau du modèle Continuum

Pour présenter notre modèle, nous utiliserons la définition ontologique de Karlsruhe (Stumme et al. (2003)). Une ontologie OWL DL est une structure  $O := (SO, \sigma O, FO)$  qui consiste en :

- Un ensemble sous-jacent SO contenant : Six ensembles disjoints  $sC$ ,  $sT$ ,  $sR$ ,  $sA$ ,  $sI$ ,  $sV$ ,  $sKR$  et  $sKA$  appelés respectivement concepts, type de donnée, relations, attributs, instances, valeurs de donnée, relations caractéristiques (telles que Symétrique, Fonctionnel, Inversement Fonctionnel, Transitif) et attributs caractéristiques (Fonctionnel). Quatre ordres partiels  $\leq C$ ,  $\leq T$ ,  $\leq R$  et  $\leq A$ , respectivement sur  $sC$  appelée hiérarchie de concepts ou taxonomie, sur  $sT$  appelée hiérarchie de type, sur  $sR$  appelée hiérarchie de relations et sur  $sA$  appelée hiérarchie d'attributs, tels que :  
 $SO := (sC, \leq C), (sT, \leq T), (sR, \leq R), (sA, \leq A), sI, sV, sKR, sKA$
- La signature  $\sigma O$  contenant : deux fonctions  $\sigma R : sR \rightarrow sC^2$  appelée signature de la relation et  $\sigma A : sA \rightarrow sC \times sT$  appelée signature d'attributs, telle que  $\sigma O := \sigma R, \sigma A$ ,
- La fonction d'interprétation FO contenant les fonctions :
  - $\iota C : sC \rightarrow 2^{si}$  correspondant à l'instantiation de concepts,
  - $\iota T : sA \rightarrow 2^{sv}$  correspondant à l'instantiation de types de données,
  - $\iota R : sC \rightarrow 2^{si \times si}$  correspondant à l'instantiation de relations,
  - $\iota A : sC \rightarrow 2^{si \times sv}$  correspondant à l'instantiation d'attributs,
  - $\kappa R : sR \rightarrow 2^{skr}$  correspondant à la caractérisation de relations,
  - $\kappa A : sA \rightarrow 2^{ska}$  correspondant à la caractérisation d'attributs,
  - $-R : sR \rightarrow 2^{sr}$  correspondant à la spécification de la relation inverse,
- $sC = \text{TopConcept, SpatialObject, Feature, Geometry, TimeSlice, Time, TimeInterval, TimeInstant}$ ,
- $sT = \text{TopType, dateTime, String}$ ,
- $\leq C = (\text{TopConcept, SpatialObject}), (\text{TopConcept, TimeSlice}), (\text{TopConcept, Geometry}), (\text{TopConcept, Time}), (\text{SpatialObject, Feature}), (\text{SpatialObject, Geometry}), (\text{Time, TimeInterval}), (\text{Time, TimeInstant})$ ,
- $\leq T = (\text{TopType, Float}) (\text{TopType, String})$ ,
- $sR = \text{TopRelation, hasFiliation, hasSpatialRelation, hasTemporalRelation, isTimesliceOf, hasGeometry, hasTime, asWKT, hasDisjoint, hasOverlaps, hasTouches, hasContains, hasWithin, hasEqual, hasContinuation, hasDerivation, hasExpansion, hasContraction, hasSplits, hasFusion, hasDerivSeparation, hasContiSeparation, hasDerivAnnexion, hasContiAnnexion, before, meets, overlaps, during, starts, finishes, after, metBy, overlappedBy, contains, startedBy, finishedBy, Equal}$ ,
- $sA = \text{TopAttribute, hasBeginInstant, hasEndInstant, hasTimeInstant}$ ,

## Un modèle sémantique spatiotemporel pour capturer la dynamique des environnements

- $\sigma R = (\text{hasFiliation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice}), (\text{hasSpatialRelation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice}), (\text{isTimesliceOf}(\text{TimeSlice}, \text{Feature})), (\text{hasGeometry}(\text{TimeSlice}, \text{Geometry})), (\text{hasTime}(\text{TimeSlice}, \text{Time})), (\text{hasDisjoint}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasOverlaps}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasTouches}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasWithin}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{isWithin}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasDisjoint}(\text{Geometry}, \text{Geometry})), (\text{hasOverlaps}(\text{Geometry}, \text{Geometry})), (\text{hasTouches}(\text{Geometry}, \text{Geometry})), (\text{contains}(\text{Geometry}, \text{Geometry})), (\text{within}(\text{Geometry}, \text{Geometry})), (\text{equal}(\text{Geometry}, \text{Geometry})), (\text{hasContinuation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasDerivation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasExpansion}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasContraction}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasSplits}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasFusion}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasDerivSeparation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasContiSeparation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasDerivAnnexation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{hasContiAnnexation}(\text{TimeSlice}, \text{TimeSlice})), (\text{equal}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{before}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{after}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{meets}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{metBy}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{overlaps}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{overlappedBy}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{during}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{contains}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{starts}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{startedBy}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{finishes}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval})), (\text{finishedBy}(\text{TimeInterval}, \text{TimeInterval}))),$
- $\sigma A = (\text{hasBeginInstant}(\text{TimeInterval}, \text{dateTime})), (\text{hasEndInstant}(\text{TimeInterval}, \text{dateTime})), (\text{hasTimeInstant}(\text{TimeInstant}, \text{dateTime})), (\text{asWKT}(\text{Geometry}, \text{String})),$
- $\leq R = (\text{TopRelation}, \text{hasFiliation}), (\text{TopRelation}, \text{hasSpatialRelation}), (\text{TopRelation}, \text{isTimesliceOf}), (\text{TopRelation}, \text{hasGeometry}), (\text{TopRelation}, \text{asWKT}), (\text{TopRelation}, \text{hasTime}), (\text{hasSpatialRelation}, \text{hasDisjoint}), (\text{hasSpatialRelation}, \text{hasOverlaps}), (\text{hasSpatialRelation}, \text{hasTouches}), (\text{hasSpatialRelation}, \text{contains}), (\text{hasSpatialRelation}, \text{within}), (\text{TopRelation}, \text{hasTemporalRelation}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{before}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{after}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{meets}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{metBy}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{overlaps}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{overlappedBy}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{during}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{contains}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{starts}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{startedBy}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{finishes}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{finishedBy}), (\text{hasTemporalRelation}, \text{equal})$
- $\leq A = (\text{TopAttribute}, \text{hasBeginInstant}), (\text{TopAttribute}, \text{hasEndInstant}), (\text{TopAttribute}, \text{hasTimeInstant}),$
- $sKR = \text{Transitive}, \text{Symmetric}, \text{Functional},$
- $sKA = \text{Functional},$
- $\kappa R = (\text{hasDisjoint}, \text{Symmetric}), (\text{hasOverlaps}, \text{Symmetric}), (\text{hasTouches}, \text{Symmetric}), (\text{hasEqual}, \text{Symmetric}), (\text{hasContains}, \text{Transitive}), (\text{hasWithin}, \text{Transitive}), (\text{hasContinuation}, \text{Functional}), (\text{hasExpansion}, \text{Functional}), (\text{hasContraction}, \text{Functional}), (\text{hasContiSeparation}, \text{Functional}), (\text{hasContiAnnexation}, \text{Functional}), (\text{equal}, \text{Symmetric}), (\text{during}, \text{Transitive}), (\text{contains}, \text{Transitive}),$
- $\kappa A = (\text{hasBeginInstant}, \text{Functional}), (\text{hasEndInstant}, \text{Functional}), (\text{hasEndInstant}, \text{Functional}), (\text{asWKT}, \text{Functional}),$
- $-R = (\text{hasContains}, \text{hasWithin}), (\text{before}, \text{after}), (\text{meets}, \text{metBy}), (\text{overlaps}, \text{overlappedBy}), (\text{during}, \text{contains}), (\text{starts}, \text{startedBy}), (\text{finishes}, \text{finishedBy}),$



### 5.3 Détection de motifs spatio-temporels au sein du modèle Continuum

Les phénomènes du monde réel à modéliser sont soumis à des contraintes. Plus un phénomène présente de contraintes pour être représenté ou détecté et plus ce phénomène se distingue des autres pour révéler sa nature unique. A l'inverse, la réduction du nombre de contraintes permet de regrouper des phénomènes selon des caractéristiques communes. S'il est évident qu'extraire la nature unique d'un phénomène s'avère l'option la plus intéressante, cette analyse est généralement limitée par le nombre de contraintes exploitables à disposition dans le système d'information. D'autre part, une analyse lancée sur la base de nombreuses contraintes se heurte généralement à des temps de calculs relativement long. En réponse aux problématiques exposées précédemment, notre approche se base sur un nombre de contraintes suffisamment générique pour regrouper un nombre conséquent de résultat, et suffisamment spécifique pour servir de support à des analyses plus poussées. Le résultat de l'analyse est stocké sous la forme de relations organisées en couche. En somme, notre approche agit comme un pré-traitement des données permettant d'accélérer les temps de calcul d'analyses de plus haut niveau ainsi que de fournir de nouveaux supports d'analyse exploitables. Dans notre modèle, nous proposons de spécialiser la relation de filiation au sein d'une hiérarchie de subsomption. La hiérarchie se compose de trois couches basées sur des contraintes :

- La couche *filiation* : seule la relation de filiation est établie afin de suivre le cycle de vie d'une entité au travers de ses évolutions. Aucune connaissance spécifique n'est portée par cette relation.
- La couche *identité* : la relation de filiation est spécialisée soit en une relation de dérivation si l'entité change sa nature, soit en relation de continuation si cette entité conserve sa nature au travers de l'évolution représentée.
- La couche *topologie et identité* : cette couche regroupe des contraintes spatiales ainsi que des contraintes d'identité pour fournir six motifs d'évolution d'une entité spatiale. Ces motifs ont été proposés dans Del Mondo et al. (2013).

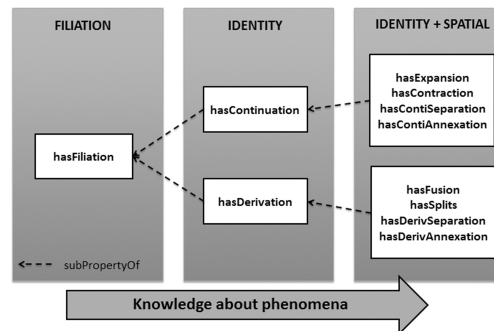
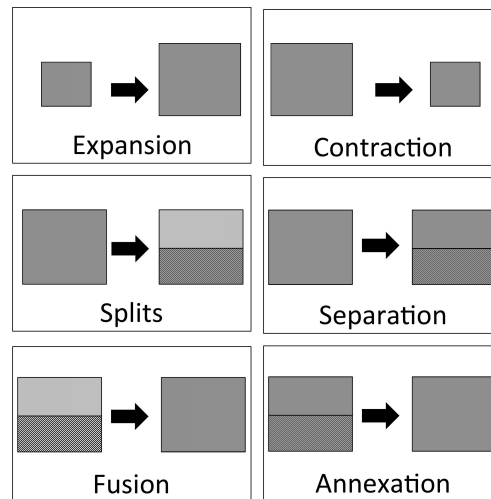


Figure 2 : Couches de qualification de la relation de filiation

La troisième couche de la hiérarchie est la plus expressive car elle décrit les motifs les plus complexes (voir Figure 3). Ces motifs font intervenir des contraintes spatiales et identitaires. Les divisions et les fusions spatiales sont détectées en vérifiant que l'union des géométries *enfants* est contenu dans la géométrie *parent* dans le premier cas et que l'union des géométries *parents* est contenu dans la géométrie *enfant* dans le second. Les fonctions d'analyses spatiales

nécessaires à cette détection sont présentes dans GeoSPARQL. Les contraintes d'identités, quant à elles sont définies par l'utilisateur selon les besoins de l'application :



- **Expansion** : l'entité continue d'exister mais la géométrie s'étend. Cette relation est une relation de continuation.
- **Contraction** : l'entité continue d'exister mais la géométrie se réduit. Cette relation est une relation de continuation.
- **Division** : l'entité parent cesse d'exister, sa géométrie se sépare en deux nouvelles géométries correspondants chacune à une nouvelle entité qui n'existait pas auparavant. Cette relation donne lieu à deux dérivations.
- **Séparation** : l'entité parent continue d'exister mais sa géométrie se sépare et une nouvelle géométrie correspondants à une nouvelle entité apparaît. Cette relation donne lieu à une continuation et au moins une dérivation.
- **Fusion** : les deux entités parents fusionnent et cessent d'exister pour donner lieu à une nouvelle géométrie correspondant à une nouvelle entité. Cette relation donne lieu à deux dérivations.
- **Annexion** : les deux entités parents fusionnent mais une seule continue d'exister. Cette relation donne lieu à une continuation et au moins une dérivation.

Si la couche *filiation* ne porte aucune connaissance liée à la nature de l'évolution et permet seulement de suivre une entité à deux instants de temps consécutifs, les deux autres couches, quant à elles, augmentent progressivement cette connaissance. Chaque couche peut être vue comme un support d'analyse de l'évolution selon des contraintes distinctes. A terme, les motifs décrits dans les couches peuvent être mis en relation avec les informations contextuelles stockées dans l'ontologie afin de décrire un phénomène spécifique du monde réel.

The diagram illustrates the relationship between static and dynamic parts of entities in a geospatial ontology. It is divided into two main sections: "Static part of entities" and "Dynamic part of entities".

**Static part of entities:**

- Geo:SpatialObject** (top level, rectangle) is connected to **Geo:Feature** (oval) via a dashed line.
- Geo:Feature** is connected to **Sa:LandParcel** (oval) via a dashed line.
- Sa:LandParcel** is connected to **Sa:IndependentState** (oval) and **Sa:ColonizedTerritory** (oval) via dashed lines.
- Sa:IndependentState** is connected to **Sa:ColonialState** (oval) via a dashed line.

**Dynamic part of entities:**

- Sa:LandParcel** is connected to **Sa:TSLandParcel** (oval) via a dashed line.
- Sa:IndependentState** is connected to **Sa:TSTIndependentState** (oval) via a dashed line.
- Sa:ColonizedTerritory** is connected to **Sa:TSTColonizedTerritory** (oval) via a dashed line.
- Sa:TSTIndependentState** is connected to **Sa:TSColonialState** (oval) via a dashed line.
- Sa:TSTColonizedTerritory** is connected to **Sa:TSColonialState** via a solid line labeled "isColonizedBy".

**Temporal and Temporal-Spatial relationships:**

- Timeslices** (oval) is connected to **Geo:Feature** via a solid line labeled "isTimesliceOf".
- Timeslices** is connected to **Date** (rectangle) via a solid line.
- Timeslices** has a self-loop labeled "hasFiliation" (red oval).
- Timeslices** is connected to **Sa:TSLandParcel** via a dashed line.

Par ailleurs, notre modèle fournit la classe *Timeslices* afin de permettre aux entités d'évoluer dans le temps. Toutefois, contrairement à l'approche *4D-fluent* (Welty et al. (2006)), notre modèle spécialise la classe *Timeslices* par réplication de l'ontologie de domaine (voir figure 3 : *partie dynamique des entités*). Ainsi, chaque classe de l'ontologie de domaine est associée à une sous-classe de la classe *Timeslices* représentant la partie dynamique des entités. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de conserver le *Domain* et le *Range* des propriétés spécifiques aux différents concepts. Par exemple, la propriété *EstColoniséPar* que nous introduisons dans notre exemple s'applique entre un *Territoire Colonisé* (*Domain*) et un *Etat Colonisateur* (*Range*). Or l'approche 4D-Fluent établit toutes propriétés dynamiques (fluents) entre des individus de la classe *Timeslices*. En d'autres termes, cette approche définit la classe *Timeslices* comme *Domain* et *Range* de toutes propriétés dynamiques. Par conséquent, toutes les propriétés dynamiques définies dans l'ontologie peuvent être appliquées à n'importe quel *timeslice* engendrant une sémantique floue et des risques d'incohérences élevés.

## Un modèle sémantique spatiotemporel pour capturer la dynamique des environnements

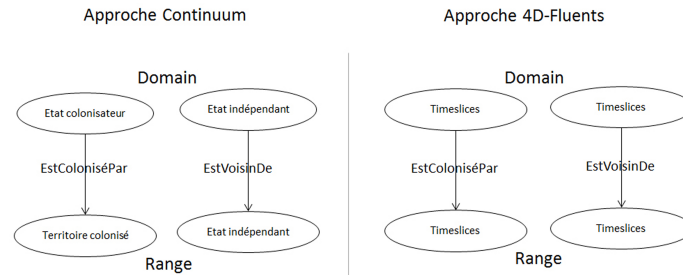


Figure 5 : Comparaison de la représentation des propriétés dynamiques dans l'approche Continuum et dans l'approche 4D-Fluents

Dans l'étude de la décolonisation, on assiste à plusieurs évolutions spatiales au niveau des frontières entre les différentes parcelles. L'identité des entités est amenée à varier lorsqu'un territoire colonisé est cédé à un autre état colonisateur ou bien lorsqu'un état accède à son indépendance. Le suivi des entités à des instants de temps consécutifs est assuré à l'aide de la relation de filiation. Lorsque l'identité est maintenue entre deux instants de temps consécutifs, la relation de continuation peut être établie. A l'inverse, si l'identité varie, alors la relation de dérivation devra être stockée.

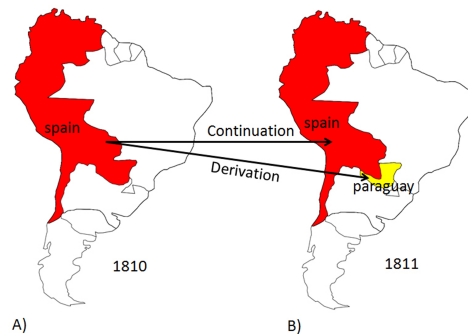


Figure 6 : Exemple de "Séparation" dans le cadre la décolonisation en Amérique du Sud

Les motifs définis dans notre modèle peuvent également être détectés au sein de l'espace modélisé et stockés dans l'ontologie sous forme d'une relation. La figure 5 représente un exemple de *séparation* intervenu entre 1810 et 1811. La *séparation* est le motif décrivant la division d'une entité spatiale avec une des parties qui conserve son identité (*Continuation*) et l'autre partie dont l'identité varie (*Dérivation*). Dans cet exemple, nous avons représenté en rouge un territoire occupé par l'Espagne tandis que le jaune représente un état indépendant issu de la séparation du territoire Espagnol. Une partie du territoire reste occupé par l'Espagne induisant une relation de continuation tandis que l'autre partie du territoire a donné naissance à un état indépendant : le Paraguay. Les relations de *Continuation* ainsi que de *Dérivation* peuvent être automatiquement détectées par le modèle. En se basant sur ces relations et par l'ajout de contraintes spatiales, il est également possible de détecter le motif de *Séparation* et de le stocker sous forme de relation. le motif de *Séparation* décrit par la figure représente en fait une partie du phénomène de *décolonisation* de l'Espagne qui s'accompagne ici d'un phénomène

d'*indépendance* pour le Paraguay. En utilisant les informations contextuelles présentes dans l'ontologie et en se basant sur les motifs préalablement détectés par le modèle, il est possible d'établir des règles permettant détecter et de suivre le processus complet de décolonisation d'un état.

```
INSERT {?ts1 ex:decolonisation ?ts2 }
WHERE {
  ?ts1 ex:hasContiSeparation?ts2 .
  ?ts1 ex:isTimesliceOf ?o1 .
  ?ts2 ex:isTimesliceOf ?o2 .
  ?o1 rdf:type ex:ColonizedTerritory .
  ?o2 rdf:type ex:ColonizedTerritory .
  ?ts1 ex:isColonizedBy ?tsColoStates1 .
  ?ts2 ex:isColonizedBy ?tsColoStates2 .
  ?tsColoStates1 ex:isTimesliceOf ?ColoStates .
  ?tsColoStates2 ex:isTimesliceOf ?ColoStates .
  ?ColoStates rdf:type ex:ColonialState .
}
```

**Algorithme 1 : Règle SPARQL pour inférer un processus de décolonisation**

```
INSERT {?ts1 ex:independance ?ts2 }
WHERE {
  ?ts1 ex:hasDerivSeparation?ts2 .
  ?ts1 ex:isTimesliceOf ?o1 .
  ?ts2 ex:isTimesliceOf ?o2 .
  ?o1 rdf:type ex:TSColonizedTerritory .
  ?o2 rdf:type ex:TSIndependantState .
}
```

**Algorithme 2 : Règle SPARQL pour inférer un processus d'indépendance d'un territoire**

Les algorithmes 1 et 2 présentés ci-dessus permettent d'inférer un processus de *décolonisation* ainsi qu'un processus de *d'indépendance* à l'aide du langage SPARQL. Il est également possible de fournir une analyse du système à l'aide de règle SWRL cependant cet outil n'étant que très rarement disponible sur les triplestores actuels, nous avons laissé cette option de côté pour le moment.

## 7 Conclusions et travaux futurs

Fort du constat qu'une représentation accrue de la connaissance liée aux entités spatiales offrent des capacités d'analyses supérieures aux SIG traditionnels, nous présentons dans ces travaux un modèle basé sur une ontologie destiné à représenter des entités spatiales ainsi que leur contexte d'évolution afin de mieux appréhender des phénomènes du monde réel. Le modèle s'articule autour de 4 composantes que sont l'espace, le temps, la sémantique et l'identité. Nous avons vu en quoi l'ontologie semblait être un candidat adéquate pour répondre aux besoins de la modélisation spatio-temporelle, c'est pourquoi nous avons rapproché nos travaux

des technologies du Web Sémantique pour définir notre modèle. En sus, nous utilisons la logique de description pour représenter notre ontologie à l'aide du langage OWL-DL. Le langage OWL-DL propose également plusieurs moteurs d'inférences pour raisonner sur des logiques de description afin de détecter des incohérences ou encore inférer des connaissances à partir de celles déjà existantes. Notre modèle peut également être interrogé au travers du langage de requête SPARQL. Les entités spatiales peuvent être représentées de façons multiples suivant les besoins d'utilisations. Par exemple, une ville peut être représentée par un simple point dans le cadre d'une application visant à situer les villes au sein d'une région, ou bien, une ville peut être définie plus précisément à l'aide d'une empreinte spatiale (généralement un polygone). De même, les frontières d'un territoire comme la France peuvent être vues au travers de celle définie pour le pays, les régions qui le composent, les départements, les villes, etc... Dès lors, l'environnement spatial peut être soumis à des contraintes de granularités spatiales permettant de visualiser et analyser l'espace géographique à différents niveaux de détails. Nos futurs travaux s'orienteront vers la prise en compte de cette granularité spatiale afin d'étendre les fonctionnalités de notre modèle.

## Remerciements

Ces travaux sont financés par 1) la Direction Générale de l'Armement, voir <http://www.defense.gouv.fr/dga/> 2) le Conseil régional de Bourgogne.

## Références

- Al-Debei, M. M., M. M. Al Asswad, S. de Cesare, et M. Lycett (2012). Conceptual modelling and the quality of ontologies : Endurantism vs. perdurantism. *International Journal of Database Management Systems* 4(3), 1–19.
- Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM* 26(11), 832–843.
- Armstrong, M. P. (1988). Temporality in spatial databases. In *Proceedings : GIS/LIS*, Volume 88, pp. 880–889.
- Claramunt, C. et M. Theriault (1996). Toward semantics for modelling spatio-temporal processes within gis. *Advances in GIS Research* 1, 27–43.
- Consortium, O. G. et al. (2012). Ogc geosparql-a geographic query language for rdf data. *OGC Candidate Implementation Standard*.
- Del Mondo, G., M. Rodríguez, C. Claramunt, L. Bravo, et R. Thibaud (2013). Modeling consistency of spatio-temporal graphs. *Data & Knowledge Engineering* 84, 59–80.
- Del Mondo, G., J. G. Stell, C. Claramunt, et R. my Thibaud (2010). A graph model for spatio-temporal evolution. *Journal of Universal Computer Science* 16(11), 1452–1477.
- Egenhofer, M. J. et K. K. Al-Taha (1992). Reasoning about gradual changes of topological relationships. In *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, pp. 196–219. Springer.

- Harbelot, B., H. Arenas, C. Cruz, et al. (2013a). Continuum : A spatiotemporal data model to represent and qualify filiation relationships. In *4th ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming (IWGS) 2013*.
- Harbelot, B., H. Arenas, C. Cruz, et al. (2013b). A semantic model to query spatial-temporal data. In *The 6th International Workshop on Information Fusion and Geographic Information Systems : Environmental and Urban Challenges*.
- Harbelot, B., A. Helbert, C. Christophe, et al. (2013c). The spatio-temporal semantics from a perdurantism perspective. In *In Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services GEOProcessing*.
- Hornsby, K. et M. J. Egenhofer (2000). Identity-based change : a foundation for spatio-temporal knowledge representation. *International Journal of Geographical Information Science* 14(3), 207–224.
- Jiang, B. et C. Claramunt (2004a). A structural approach to the model generalization of an urban street network\*. *GeoInformatica* 8(2), 157–171.
- Jiang, B. et C. Claramunt (2004b). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B* 31(1), 151–162.
- Jiang, B., C. Claramunt, et B. Klarqvist (2000). Integration of space syntax into gis for modelling urban spaces. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2(3), 161–171.
- Jiang, J. et M. Worboys (2009). Event-based topology for dynamic planar areal objects. *International Journal of Geographical Information Science* 23(1), 33–60.
- Langran, G. et N. R. Chrisman (1988). A framework for temporal geographic information. *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 25(3), 1–14.
- Milea, V., F. Frasincar, U. Kaymak, et T. Noia (2007). An owl-based approach towards representing time in web information systems. In *4th International Workshop of Web Information Systems Modeling (WISM 2007)*, pp. 791–802.
- Muller, P. (2002). Topological spatio-temporal reasoning and representation. *Computational Intelligence* 18(3), 420–450.
- Peuquet, D. J. et N. Duan (1995). An event-based spatiotemporal data model (estdm) for temporal analysis of geographical data. *International journal of geographical information systems* 9(1), 7–24.
- Stell, J., G. Del Mondo, R. Thibaud, et C. Claramunt (2011). Spatio-temporal evolution as bigraph dynamics. In *Spatial Information Theory*, pp. 148–167. Springer.
- Stumme, G., M. Ehrig, S. Handschuh, A. Hotho, A. Maedche, B. Motik, D. Oberle, C. Schmitz, S. Staab, L. Stojanovic, N. Stojanovic, R. Studer, Y. Sure, R. Volz, et V. Zacharias (2003). The Karlsruhe view on ontologies. Technical report, University of Karlsruhe, Institute AIFB.
- Welty, C., R. Fikes, et S. Makarios (2006). A reusable ontology for fluents in owl. In *FOIS*, Volume 150, pp. 226–236.
- Worboys, M. F. (1994). A unified model for spatial and temporal information. *The Computer Journal* 37(1), 26–34.

## Summary

Geographic Information Systems have gradually emerged as powerful tools to organize, represent, analyze and visualize geographic data, however, the integration of a temporal dimension in GIS remains a challenge for research in sciences geographic information. Therefore, the development of spatio-temporal models suited to the study of real geographic phenomena becomes a major issue in the design of information systems dedicated to the evolution of spatial entities. In this work, we propose a new spatio-temporal model based on ontology incorporating expert knowledge on spatial data represented. Ultimately, this model allows experts to be assisted in the representation and analysis of spatio-temporal phenomenon.